

基于时间反演的运动阵列远场功率合成

田思源¹, 陈秋菊¹, 黄建冲¹, 陈本章²

(1. 国防科技大学电子对抗学院电子对抗信息处理实验室, 合肥, 230037; 2. 73676 部队, 江苏江阴, 214400)

摘要 首先从理论上分析了时间反演技术运用于运动阵列近场功率合成的可能性及存在的难点和问题建立了基于时间反演技术的运动阵列远场功率合成数学模型。基于此模型,通过对信标信号从不同方向入射情况下的回溯信号波束指向进行仿真,证实了阵列辐射的 TR 信号可以实现自适应回溯并且比传统相控阵方法形成的合成波束能量更加集中;通过仿真获得单元天线设置为全向天线和有方向性天线时的合成信号主瓣波束 3 dB 宽度,排除了由于阵列与目标点间的相对切向运动导致目标点脱离合成波束主瓣波束覆盖范围的可能性;分析了随机相位误差和波束指向误差对合成效果的影响,仿真结果表明:随机相位误差对回溯信号合成波束指向影响很小,但对信号的合成效果存在一定影响,由信号多普勒频移引起的波束指向误差对信号的自适应回溯影响很小。所得结论可为时间反演技术在远场功率合成的实际运用提供一定的理论依据。

关键词 时间反演;平行波束;空间功率合成;运动阵列

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.01.010

中图分类号 TN97 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)01-0058-06

Research on Far-Field Power Synthesis of Moving Array Based on Time Inversion Technology

TIAN Siyuan¹, CHEN Qiuju¹, HUANG Jianchong, CHEN Benzhang²

(1. Laboratory of Electronic Countermeasures Information Processing, College of Electronic Countermeasures, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;
2. Unit 73676, Jiangyin 214400, Jiangsu, China)

Abstract Firstly, the difficulties and problems of applying time inversion technique to near-field power synthesis of moving array are analyzed theoretically, and the feasibility of applying time inversion technique to far-field power synthesis of moving array is also discussed. A mathematical model of far-field power synthesis of moving array based on time inversion technique is established. On the basis of this model, by simulating the beam pointing of the retrospective signal when the beacon signal is incident from different directions, the TR signal radiated by the array can achieve adaptive retrospective and is more concentrated beam energy than that of the synthesized beam formed by the traditional phased array method. The 3dB width of the main lobe beam of the synthesized signal when the unit antenna is set as omnidirectional antenna and directional antenna is obtained by simulation. The possibility that the target point is separated from the coverage of the main lobe beam of the synthesized beam due to the relative tangential motion be-

收稿日期: 2019-04-26

基金项目: 安徽省自然科学基金(1708085QF149)

作者简介: 田思源(1996—),男,安徽合肥人,硕士生,主要从事电磁波空间功率合成研究。E-mail:1124009805@qq.com

引用格式: 田思源,陈秋菊,黄建冲,等. 基于时间反演的运动阵列远场功率合成[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(1): 58-63. TIAN Siyuan, CHEN Qiuju, HUANG Jianchong, et al. Research on Far-Field Power Synthesis of Moving Array Based on Time Inversion Technology[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(1): 58-63.

tween the array and the target point is eliminated. The influence of random phase error and beam pointing error on the synthesized beam pointing of backtracking signal is analyzed. The simulation results show that the random phase error has little effect on the synthesized beam pointing of backtracking signal, but has a certain of effect on the synthesized signal. The beam pointing error caused by Doppler shift of signal has little effect on the adaptive backtracking of signal. The conclusions can provide a theoretical basis for the practical application of time inversion technology in far-field power synthesis.

Key words time inversion; parallel beam; spatial power synthesis; motion array

时间反演(Time Reversal, TR)技术自提出以来,最早应用于声学领域,2004 被引入电磁学领域。由于时间反演电磁波具有自适应空时聚焦性能,并且其在复杂环境下的鲁棒性强,能够有效地减小多径效应的影响^[1-6]。因此在超宽带通信、图像传输、功率合成等领域有着很好的应用前景^[7-9]。

目前已经有学者对基于 TR 技术的稀疏固定阵列条件下的近场功率合成进行了研究^[10-12],研究结果表明采用 TR 技术能够在较小的目标区域获得良好的合成效果。但对于 TR 技术在运动阵列空间功率合成中的应用研究相对较少。并且随着技术水平的进步,电子设备的体积越来越小,电子对抗装备由传统的陆基固定干扰站向机载平台发展,电子对抗系统也在由传统的“硬件化”向“软件化”再向“认知化”转变^[13-14]。所以有必要对基于 TR 技术的运动阵列空间功率合成开展研究。

1 基于 TR 的运动阵列空间功率合成可行性分析

电磁波的合成可分为 2 种方式:近场的交叉波束合成和远场的平行波束合成。近场交叉波束合成基于波的干涉效应,在目标区域形成网状的能量栅格;远场平行波束合成原理类似于相控阵雷达,其合成效果可用天线阵列的方向图来衡量^[15-16]。如图 1 所示,以 $R = \frac{2L^2}{\lambda}$ 作为近远场的边界条件, L 为天线尺寸, λ 为波长。下面分近远场 2 种情况讨论。

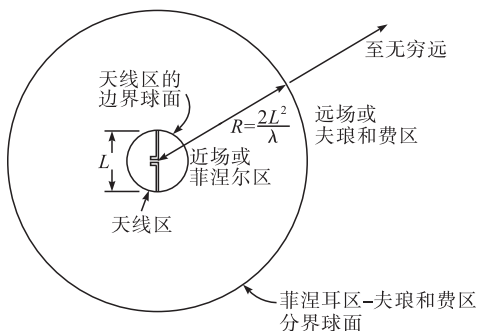


图 1 电磁辐射近远场划分示意图

1.1 近场情形可行性分析

如图 2 所示,运动阵列中第 $i(i=1,2,\dots,N)$ 个阵元相对于目标点 T 的径向速度值为 V_i ,与目标点 T 之间的距离为 r_i 。

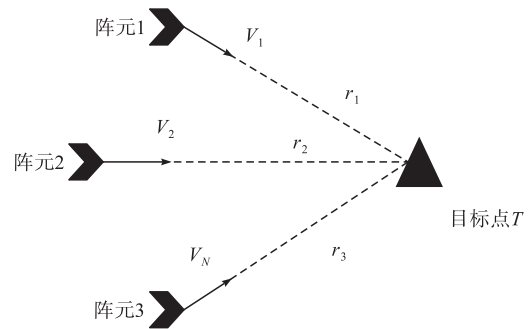


图 2 近场情形阵元与目标位置示意图

假设目标点发射的信标信号为:

$$S(t) = K \cdot \exp[j(2\pi f_0 t + \varphi_0)] \quad (1)$$

式中: f_0 为信号载频; φ_0 为信标信号初始相位; K 为幅度系数。

经过空间传播,到达第 i 个阵元的信号为:

$$S_{ri}(t) = K_i \cdot \exp\{j[2\pi(f_0 - f_{di}) \cdot (t - \tau_i) + \varphi_0]\} \quad (2)$$

式中: f_{di} 为第 i 个阵元接受信号过程中产生的多普勒频移, $f_{di} = \frac{2V_i}{c - V_i}$; τ_i 为由于距离 r_i 产生的时间延迟, $\tau_i = \frac{r_i}{c}$, c 为光速;

$f_0(\theta_i, \alpha_i)$ 为信源天线发射方向图; $f_{ir}(\theta_{ir}, \alpha_{ir})$ 为第 i 个阵元接收天线方向图; $K_i = \frac{K \cdot f_0(\theta_i, \alpha_i) \cdot f_{ir}(\theta_{ir}, \alpha_{ir})}{r_i}$ 。

TR 技术从理论上来说即是对信号进行时域上的翻转,每个阵元对接收到的信号进行 TR 操作,那么第 i 个阵元所产生的 TR 信号为:

$$S_{TRI}(t) = B_i \cdot \exp\{j[2\pi(f_0 - f_{di}) \cdot (-t - \tau_i) + \varphi_0]\} \quad (3)$$

B_i 为调制后的信号幅度。假设系统进行 TR 操作的时间为 Δt ,在该时间间隔内,阵元与目标点的相对距离变化了 Δr , $\Delta r = V_i \cdot \Delta t$ 那么在目标点处接受到的阵元发射的回溯信号为:

$$S_{TRI}(t) = B_i' \cdot \exp\{j[2\pi(f_0 - f_{di}') \cdot$$

$$(-(t-\tau'_i)-\tau_i)+\varphi_0]\} \quad (4)$$

式中: $f'_d = \frac{2V_i c}{(c-V_i)^2}$ 为信标信号接收过程中以及回溯信号发射过程中产生的总多普勒频移。 $\tau'_i = \frac{r_i - \Delta r}{c}$ 为回溯过程中产生的时间延迟。代入式(4),得:

$$S_{\text{TR}i}(t) = B'_i \cdot \exp \left\{ j \left[2\pi f_0 \left(1 + \frac{4V_i c}{(c-V_i)^2} \right) \cdot \left(-t - \frac{V_i \Delta t}{c} \right) + \varphi_0 \right] \right\} \quad (5)$$

由式(5)可知,各路信号能否在目标点处实现精确的同相叠加取决于各阵元相对目标点的径向速度是否一致。

算例分析:假设阵列包含 2 个阵元,一个阵元固定,另一阵元相对目标点以 200 m/s 的径向速度运动,信标信号频率为 10 GHz,系统进行 TR 操作所需时间为 10 ms,电磁波传播速度取 3×10^8 m/s。通过计算可得,两阵元回溯至目标点的信号之间由于多普勒频移引起的频率差约为 2.67×10^4 Hz,由于径向速度不一致导致的相位差约为 11.6π 。由文献[11]可知,若想在目标点处获得良好的合成效果,回溯信号相位差应在 $\frac{\pi}{3}$ 内,那么系统的时间补偿精度需达到 10^{-2} ns 级别,且载体的相对径向速度很难保持恒定,工程实现难度很大。

1.2 远场情形可行性分析

当阵列阵元同向运动且与目标点的距离足够远时,信标信号到达阵列处可视为平面波,各阵元相对于目标点的径向速度也可视为相等,那么由式(5)可知,理论上可以在目标点处实现精确的同相叠加。下面建立基于 TR 的一维线阵远场功率合成模型:

如图 3 所示, N 个阵元组成一维线阵,相邻阵元间距为 d , λ 为波长, θ 为信标信号入射角, β 为信标信号的等相位波前, P 为目标点。

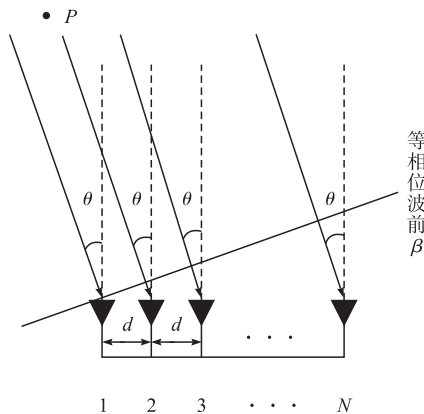


图 3 一维线阵的远场功率合成示意图

假设以 1 号阵元作为相位参考点,第 i 个阵元的相位延迟为 $\varphi_i = \frac{2\pi}{\lambda} i d \sin \theta$ 。则第 i 个阵元接收到的信号为:

$$S_{ri}(t) = K_i \cdot \exp \{ j [2\pi t (f_0 - f_d) + \varphi_0 + \varphi_i] \} \quad (6)$$

式中: f_d 为信号接收过程中产生的多普勒频移,由于各阵元相对目标点径向速度一致,所以产生的多普勒频移可视为相同。

对接收到的信号进行 TR 操作(时域的时间反演等效于频域的相位共轭),得到的 TR 信号为:

$$S_{\text{TR}i}(t) = B_i \cdot \exp \{ j [-2\pi t (f_0 - f_d) - \varphi_0 - \varphi_i] \} \quad (7)$$

将 TR 信号加载到各个阵元上,同时发射,由于 TR 电磁波具有自适应回溯特性,可以自动抵消由于波程差引起的相位差,所以在 P 点处接收到的第 i 个阵元的回溯信号为:

$$S'_{\text{TR}i}(t) = B'_i \cdot \exp \{ j [-2\pi t (f_0 - f'_d) - \varphi_0] \} \quad (8)$$

式中: $f'_d = \frac{4v_i c}{(c-v_i)^2}$ 为第 i 个阵元在信号接收及发射过程中产生的总多普勒频移; v_i 为第 i 个阵元相对目标点的径向速度,由于阵列天线与目标点的距离足够远,可视为 $v_1 = v_2 = \dots = v_N$ 。

则在目标点处获得的叠加信号为:

$$S'_{\text{TR}}(t) = \sum_{i=1}^N B'_i \cdot \exp \{ j [-2\pi t (f_0 - f'_d) - \varphi_0] \} \quad (9)$$

2 基于 TR 的运动阵列远场空间功率合成仿真

在基于稀疏阵列的近场功率合成中,交叉波束合成基于波的干涉效应,在目标区域形成网状的能量栅格,所以主要通过比较有效功率点的分布情况来衡量合成效果^[12]。在远场功率合成中,合成波束为一个扇面,可以利用合成波束的 3 dB 宽度以及目标点处叠加电场的强度来衡量合成效果。叠加电场强度的计算可以参考文献[17]中的方法。

假设一维线阵由 9 个同型号天线组成,各阵元频率、极化及天线类型都一致,相邻阵元间距 $d = \frac{\lambda}{4}$,信标信号频率 $f_0 = 1$ GHz。为了简化分析,将阵列视作相对固定,目标点与阵列间的相对径向速度为 200 m/s,由式 $f'_d = \frac{4vc}{(c-v)^2}$ 可计算得到信号在接收及再发射过程中产生的总多普勒频移为 $1.33 \times$

10^{-3} MHz,在信号再发射之前对信号进行频率补偿。分别对单元天线设置为全向天线和主瓣波束为 40° 的有方向性天线 2 种情况进行研究。并在不同天线类型设置的条件下,分信标信号沿阵列法线方向入射和沿与法线成 30° 方向入射 2 种情况进行 TR 信号回溯仿真实验。

2.1 TR 信号回溯仿真实验(单元天线为全向天线)

2.1.1 信号沿阵列法线方向入射

图 4 中,阵列接收沿法线方向入射的信标信号,对其进行 TR 操作后再辐射出去。如图 4(a)所示,回溯信号形成的合成波束主瓣指向法线方向,即信号入射方向。由于各单元天线为全向天线,所以图 4(b)中存在 2 个方向相反的主瓣波束,主瓣波束的 3 dB 宽度约为 17° 。

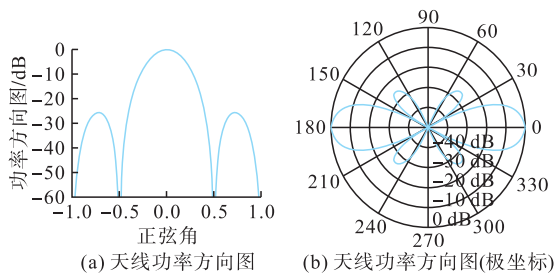


图 4 基于 TR 技术的天线功率方向图

图 5 是利用传统相控阵方法进行功率合成时获得的阵列天线方向图。在图 5(a)中,横坐标的数值表示某方向与阵列法线夹角的正弦值,在仿真过程中只显示了 $[0, 90^\circ] \cup [270^\circ, 360^\circ]$ 角度范围内的波形,而在图 5(b)中,展示了 $[0^\circ, 360^\circ]$ 角度范围内的波形图。通过对比可以发现:相比传统相控阵方法,利用 TR 技术获得的合成波束具有更少的旁瓣,能量更为集中。

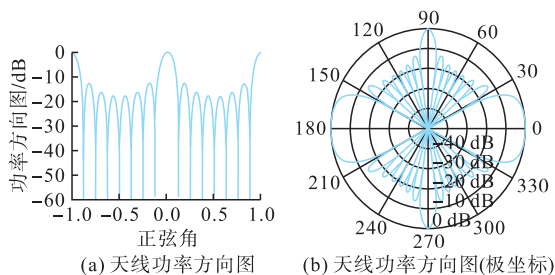


图 5 基于相控阵技术的天线功率方向图

2.1.2 信号沿偏离阵列法线 30° 方向入射

当信标信号沿偏离阵列法线 30° 方向入射时,系统对阵列接受到的信号进行 TR 操作后再发射出去。如图 6 所示,回溯信号形成的合成波束主瓣指向信号入射方向,主瓣波束的 3 dB 宽度约

为 17° 。

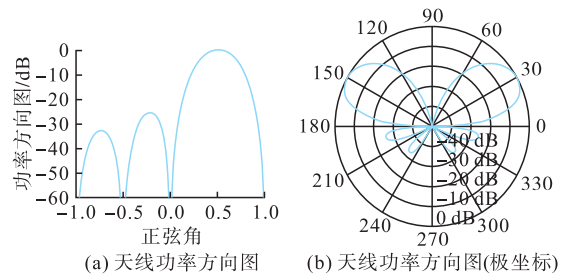


图 6 基于 TR 技术的天线功率方向图
(入射信号偏离法线 30°)

2.2 TR 信号回溯仿真实验(单元天线为 40° 的有方向性天线)

2.2.1 信号沿阵列法线方向入射

单元天线设置为主瓣波束宽度为 40° 的有方向性天线,假设每个单元天线主瓣波束都指向信号入射方向,阵列对沿着阵列法线方向入射的信标信号进行接收、反演、再发射。如图 7 所示,回溯信号形成的合成波束主瓣指向信号入射方向,主瓣波束的 3 dB 宽度约为 11.4° 。

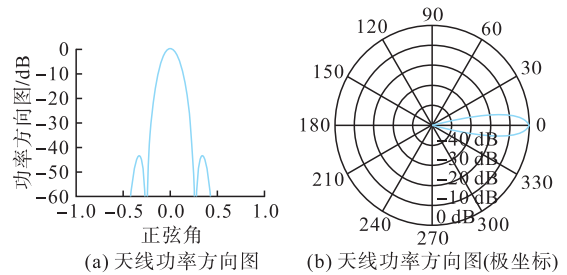


图 7 基于 TR 技术的天线功率方向图(有方向性天线)

2.2.2 信号沿偏离阵列法线 30° 方向入射

单元天线设置为主瓣波束宽度为 40° 的有方向性天线,假设信标信号沿偏离阵列法线 30° 方向入射,每个单元天线主瓣波束都指向信号入射方向,阵列对沿着阵列法线方向入射的信标信号进行接收、反演、再发射。如图 8 所示,回溯信号形成的合成波束主瓣指向信号入射方向,主瓣波束的 3 dB 宽度约为 11.4° 。

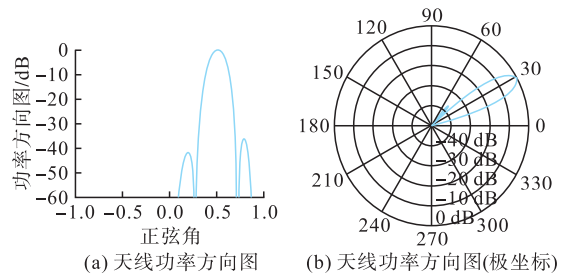


图 8 基于 TR 技术的天线功率方向图(有方向性天线,入射信号偏离法线 30°)

通过仿真可以看出,主瓣波束指向随着信标信号入射方向的改变而改变,且能够对准信号入射方向。这也证实了 TR 信号可以实现自适应回溯并在

目标点完成聚焦。

由于阵列与目标点间可能同时存在径向与切向运动,所以除了考虑径向运动产生的多普勒频移对功率合成带来的影响外,还需考虑目标点相对阵列的切向运动是否会导致目标点脱离阵列主瓣波束的覆盖范围。假设目标点位于阵列主瓣波束轴线上且距离阵列平面 50 km,系统进行 TR 操作及电磁波传播所需时间为 20 ms。由前述仿真可知,当单元天线主瓣波束宽度为 40° 时,合成波束主瓣的 3 dB 宽度约为 11.4° ,通过计算可知目标点需要在 20 ms 的时间内移动 4.97 km 才能够脱离合成波束 3 dB 宽度的覆盖范围,目前还没有任何一个载体能够达到这个速度,所以即使目标点与阵列存在相对的切向运动,在目标点附近仍能获得有效的合成信号。

2.3 合成波束能量分布仿真实验

在研究了不同条件设置下阵列合成波束指向及宽度后,还需对主瓣波束内信号叠加的能量分布情况进行研究。假设阵列由 9 个全向天线构成,阵列总辐射功率为 1 W,分为信标信号沿阵列法线方向入射和沿偏离法线 30° 方向入射这 2 种情况,分别计算主瓣波束轴线上的叠加场强。仿真计算结果如图 9 所示。

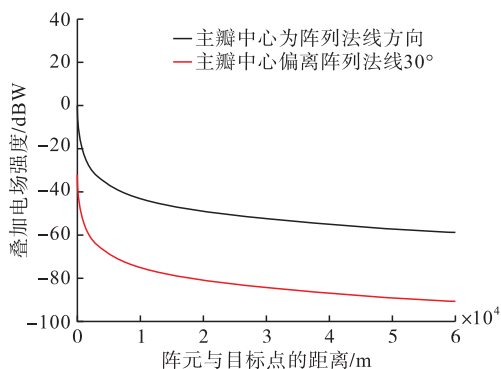


图 9 阵列目标点距离与叠加场强关系图

从图中可以看出:相比信标信号从偏离法线 30° 的方向入射时回溯信号形成的叠加场强,信标信号从阵列法线方向入射时回溯信号形成的叠加场强值更高。在 $0 \sim 5$ km 范围内,叠加场强值下降的较为迅速,随后下降趋势放缓。取典型值 50 km,当信标信号沿阵列法线入射时,50 km 处的叠加场强值约为 -58 dBW;当信标信号沿偏离法线 30° 的方向入射时,50 km 处的叠加场强值约为 -90 dBW。

3 误差分析

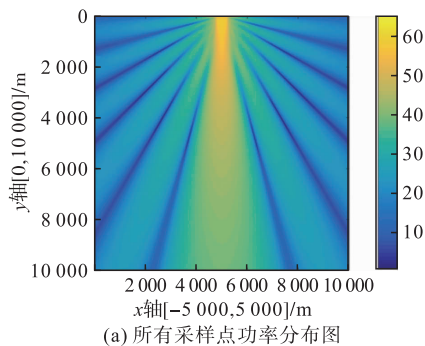
对于基于 TR 技术的远场功率合成系统而言,合成效果的主要影响因素有 2 个:一是回溯信号之

间的相位误差,这部分误差是由于系统的时间同步精度、电子设备制造工艺水平限制等因素造成,可视为随机误差进行分析^[18-19];二是由于天线阵尺寸、单元天线的方向性、信号收发频偏等因素引起的波束指向误差(Beam point Error, BPE)。对于 TR 运动阵列,收发频偏主要是由于阵列与目标点间的相对运动导致的多普勒频移引起。

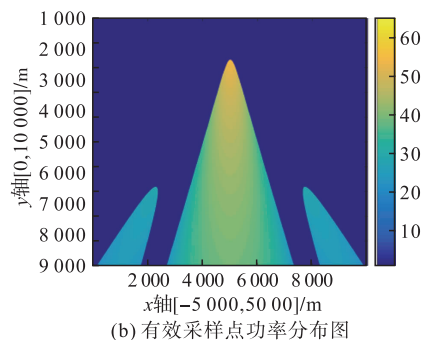
3.1 随机相位误差

假设线性阵列由 9 个主瓣波束宽度为 40° 的单元天线构成,单元天线主瓣指向目标点,各阵元频率、极化及天线类型都一致,相邻阵元间距 $d = \frac{\lambda}{4}$,信标信号频率 $f_0 = 1$ GHz,各阵元均布在 x 轴上,目标点位于阵列法线方向,初始位置坐标为 $T(5\ 000, 5\ 000)$,目标点与阵列间的相对径向速度为 200 m/s。假设相位误差值服从均值为 0,标准差为 $\frac{\pi}{3}$ 的高斯分布,分有无误差 2 种情况,对区域 $D(x, y), x \in [-5\ 000, 5\ 000], y \in [0, 10\ 000]$ 内的功率分布情况进行仿真分析。

图 10(a)给出了无误差情况下区域 D 所有采样点的功率分布情况,从图中可以明显看出,回溯信号合成波束主瓣指向目标点处,为了便于观察,取目标点处功率值为基准值,将区域内其他功率值小于 $\frac{1}{3}$ 倍基准值的采样点的功率置零,如图 10(b)所示,得到有效功率点的分布图。



(a) 所有采样点功率分布图



(b) 有效采样点功率分布图

图 10 无误差时功率分布图

图 11 分别给出了各阵元回溯信号之间存在服

从高斯分布的随机误差时,区域 D 中所有采样点的功率分布情况和有效功率点的分布情况。

对比有无误差 2 种情况下的远场功率合成情况可以发现:虽然有误差时的合成功率强度明显低于无误差时的合成功率强度,但合成波束主瓣的 3 dB 宽度以及波束主瓣指向与无误差时大致相同,所以即使回溯信号之间存在服从均值为 0、标准差为 $\frac{\pi}{3}$ 的高斯分布的随机误差,对 TR 信号的自适应回溯也不会产生太大的影响,可以通过提高各阵元的发射功率,在目标点处获得需要的合成功率强度。

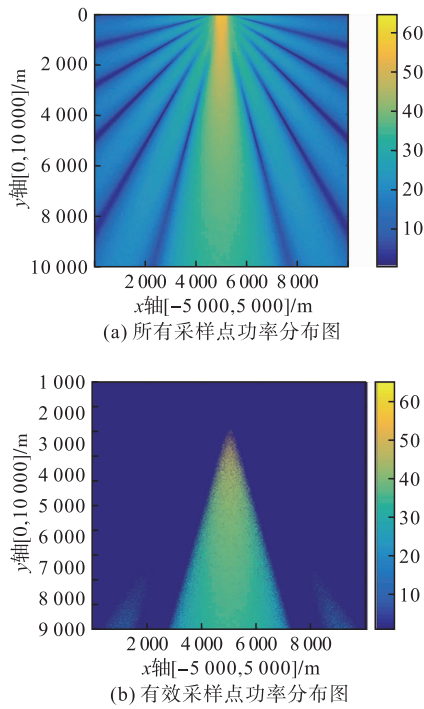


图 11 有误差时功率分布图

3.2 波束指向误差

利用文献[20]给出的平面阵列最大 BPE 计算方法可推得线性阵列最大 BPE 的计算公式:

$$BPE(\theta_{in}) = \sin^{-1} \left(\frac{f_{in}}{f_s} \sin \theta_{in} \right) - \theta_{in} = \sin^{-1} \left(\frac{1}{1+B} \sin \theta_{in} \right) - \theta_{in} \quad (10)$$

式中: θ_{in} 为信号入射角; f_{in} 为入射信号频率; f_s 为回溯信号频率, 定义 $B = \frac{(f_s - f_{in})}{f_{in}}$ 为相对带宽。假设目标与阵列间的相对径向运动速度为 200 m/s, 入射信号频率为 $f_{in} = 1$ GHz, 各阵元天线主瓣波束宽度为 40° 。多普勒频移的相对带宽可由式(11)确定。

$$\frac{f_s - f_{in}}{f_{in}} = \frac{(2v \cos \theta)/c}{1 - (v \cos \theta)/c} \quad (11)$$

如图 12 所示, 当信号沿阵列法线方向入射时, BPE 为 0; 当信号沿偏离阵列法线 90° 方向入射时, BPE 值最大, 为 0.6° 。

由上节仿真可知, 合成波束主瓣的 3 dB 宽度约为十几度, 在目标点距离阵列 50 km 的位置上, 即使由多普勒频移引起的波束指向误差达到最大, 目标与阵列间的相对切向运动仍不会导致目标脱离合成波束主瓣的 3 dB 波束宽度覆盖范围, 所以由多普勒频移引起的波束指向误差可以忽略不计, 计算结果也表明基于 TR 的远场功率合成技术可以运用于目标和阵列存在相对运动的情况且不会影响自身的合成效果。

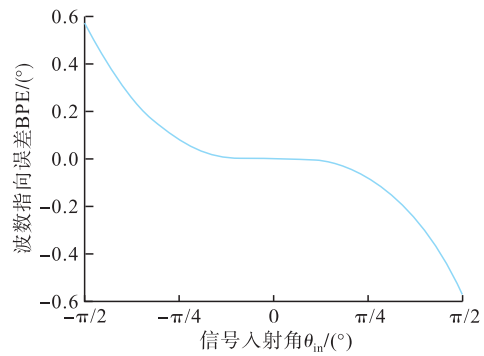


图 12 信号入射角度与 BPE 关系图

4 结语

本文首先从理论上分析了当阵列与目标存在相对运动时, TR 技术运用于近场功率合成存在的问题和运用于远场功率合成的可行性, 并建立基于 TR 技术的运动阵列远场功率合成数学模型。通过仿真验证了阵列辐射的 TR 信号可以实现自适应回溯并在目标点附近形成一定功率强度的合成信号。通过与采用传统相控阵技术的功率合成效果的对比, 发现利用 TR 技术获得的合成波束具有更少的旁瓣, 能量更加集中。最后通过仿真分析了信号合成过程中 2 种主要误差因素—回溯信号之间的相位误差和合成波束的指向误差对信号合成效果的具体影响, 仿真结果表明, 由多普勒频移引起的波束指向误差对信号的合成效果影响很小, 目标点附近仍可以获得一定强度的合成信号, 而随机相位误差主要影响信号的合成强度, 对合成波束的主瓣宽度以及指向影响很小, 可以通过提高单个阵元发射功率的方法在目标点处获得需要的合成功率强度。以上结论可以为 TR 技术在空间功率合成的实际运用提供一定的理论支撑。

(下转第 70 页)

- Journal of Robust & Nonlinear Control, 2010, 3(2): 133-153.
- [13] GREENE R A. Airborne Detection of Low-Level Wind Shear [J]. Journal of Aircraft, 2015, 16(12): 823-827.
- [14] 陈健伟,王良明,李子杰. 两种典型低空风切变对火箭弹弹道特性的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(5): 1008-1017.
- [15] 孙毅,李正良,黄汉杰,等. 山地风场平均及脉动风速特性试验研究[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(5): 593-599.
- [16] SHEPPARD P A. Airflow over Mountains[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 82(354): 528-529.
- [17] SCORER R S. Theory of Airflow over Mountains: IV -Separation of Flow from the Surface[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 81(349): 340-350.
- [18] 刘刚,洪冠新,金长江. 复杂地形上空超低空风场的工程仿真方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(3): 193-196.
- [19] 陈健伟,王良明,傅健. 用于实时弹道仿真的低空风切变复合模型[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(11): 2597-2604.
- [20] 徐明友. 火箭外弹道学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2004: 136-146.

(编辑:徐敏)

(上接第 63 页)

参考文献

- [1] LEROSEY G, ROSNY J D, TOURIN A, et al. Time Reversal of Electromagnetic Waves[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(19): 193904.
- [2] FIND M, PRADA C, WU F, et al. Self Focusing in Inhomogeneous Media with Time Reversal Acoustic Mirrors[C]// IEEE Ultrasonics Symposium. Montreal, Quebec, Canada: IEEE, 1989: 681-686.
- [3] PARVULESCU A, CLAY C S. Reproducibility of Signal Transmissions in the Ocean[J]. Radio and Electronic Engineer, 1965, 29(4): 223-238.
- [4] LEROSEY G, ROSNY J, TOURIN A, et al. Time Reversal of Wideband Microwaves [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(15): 154101.
- [5] PENDRY J B. Time Reversal and Negative Refraction [J]. Science, 2008, 322(5898): 71-73.
- [6] TREFNA H D, TOGNI P, SHIEE R, et al. Design of a Wideband Multi-Channel System for Time Reversal Hyperthermia[J]. International Journal of Hyperthermia; the Official Journal of European Society for Hyperthermic Oncology, North American Hyperthermia Group, 2012, 28(2): 175-183.
- [7] CARMINATI R, PIERRAT R, ROSNY J, et al. Theory of the Time Reversal Cavity for Electromagnetic Fields [J]. Optics Letters, 2007, 32(21): 3107-3109.
- [8] ROSNY J, FINK M. Focusing Properties of Near-Filed Time Reversal [J]. Physical Review A, 2007, 76(6): 065801(1-4).
- [9] 孙程光. 基于模拟信号处理的电磁时间反演实现方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [10] 陈秋菊,姜秋喜,曾芳玲,等. 稀疏阵列相干信号功率合成栅基仿真技术[J]. 现代雷达, 2015, 37(11): 87-91.
- [11] 陈秋菊,姜秋喜,曾芳玲,等. 基于时间反演电磁波的稀疏阵列单频信号功率合成研究[J]. 物理学报, 2015, 64(20): 204101-1-6.
- [12] 陈秋菊,姜秋喜,曾芳玲,等. 稀疏阵列时间反演脉冲信号空间功率合成方法[J]. 电波科学学报, 2016, 31(3): 553-561.
- [13] MANZ B. Cognition: EW Gets Brainy [J]. The Journal of Electronic Defense, 2012, 35(10): 32-39.
- [14] 张春磊,杨小牛. 认知电子战初探[J]. 通信对抗, 2013, 32(2): 1-4, 20.
- [15] 张嘉焱,舒挺,袁成卫. 高功率微波空间功率合成的初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, 29(6): 915-918.
- [16] 何向翎. 分布式阵列功率合成及 DOA 估计研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [17] 范加武. X 波段多普勒雷达功率放大及空间功率合成技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.
- [18] 陈秋菊,曾芳玲,姜秋喜,等. 稀疏点源波束干涉合成建模与特征提取算法[J]. 探测与控制学报, 2015, 36(5): 35-39.
- [19] 高强,王晓华,王秉中. 基于宽带立体超透镜的远场超分辨率成像[J]. 物理学报, 2018, 67(9): 094101.
- [20] 郭玉春,张光生,周军. 方向回溯天线理论研究[J]. 通信对抗, 2009(4): 48-53.

(编辑:徐楠楠)